

リモートセンシングによる 斜面のり面の安全性評価に 関する研究



石黒 進也*・友利 方彦*・島村 誠*

現在、鉄道沿線の斜面のり面等の安全性評価は、地上目視検査結果や航空写真などの情報にもとづく定性的な評価が中心である。また、広範囲にわたる沿線斜面や渓流を検査対象とする場合には、多大なる労力を要しているのが実情である。これらの課題を解決するため、安全研究所では広域の空間情報を効率よく計測する技術として近年技術進歩の著しいリモートセンシング技術の鉄道防災分野への適用性を検討するとともに、鉄道沿線のモデルエリアを設定し、実際にリモートセンシングにより得られたデジタルデータをもとにGIS(地理情報システム)を用いた「斜面災害リスク評価システム」を試作した。このシステムにより、これまで困難であった広範囲にわたる沿線斜面や渓流の安全性を定量的に評価することができ、さらにビジュアル表示された画像から視覚的に危険度を読み取ることが可能となった。

●キーワード：リモートセンシング、GIS、斜面災害、安全性評価

1 はじめに

現在、斜面のり面等の安全性評価は主として徒歩巡回による目視検査にもとづいて行われている。この方法は、多大な労力を要する反面、目の届かない場所にある災害発生の兆候などの発見が難しく、ベテラン社員の経験に頼る検査体制となっており、今後の技術継承面での不安等、様々な問題を抱えている。

そこで、平成14年度から、近年進歩の著しい上空からのリモートセンシング技術やGISを用いた先進的な手法を活用し、鉄道沿線の斜面のり面等の安全性を定量的に評価する手法について研究開発を進めている。

2 リモートセンシング技術の鉄道防災分野への適用性

上空からのリモートセンシング技術を活用するにあたり、まず、航空機やヘリコプターを利用した計測技術である『レーザ計測』、『ラインセンサー』、『ヘリビデオ』、『空中物理探査』の4手法の特性について調査を実施した。次に、実際に計測された既存データをもとに現行の沿線徒歩巡回による検査との比較を行い、リモートセンシング技術の鉄道防災分野への適用性を評価した。

2.1 レーザ計測

空中から地上に向けて33,000Hzのレーザを照射し、反射波から地表面の高密度な位置・高さ情報(XYZ座標値)を取得する手法である。

①長所：空間の高密度な情報を得ることが可能であるため、樹木の影響を取り除くことができ、樹冠下の微細な地形面を表現することができる。つまり、地形形状を精度よく捉えることができる。

②短所：写真のように色や質感などの情報がないため形状しか判別できず、実体はわからない。表面の地質や植生の種類、亀裂や湧水等の有無や構造物の変状等、視覚的に判断する必要がある項目についてはわからない。また、地表面に積雪がある場合は計測精度が劣る。

2.2 ラインセンサー

空中からスリーラインセンサーにより前方視・直下視・後方視の3方向のモノクロ画像を取得する。隣り合う画像を用いて空中写真測量の原理に基づき地形のXYZ座標値を得る。

①長所：3方向からの画像を同時に取得するため、1方向の画像だけでは判定できない地形情報を補完し、高い精度での抽出が可能である。

②短所：画像に写った樹木の被覆状況により、不安定地形の抽出精度が影響を受ける。一般に、レーザ計測に比べ形状の認識精度は悪い。また、モノクロ情報であるため、暗部の状況や構造物表面の詳細状況を把握することは難しい。

2.3 ヘリビデオ

空中から高性能のビデオカメラにより、カラー映像を取得する。動画の状態あるいは動画から静止画像を作成して視覚的に地形や植生状況、構造物の状態を判読する。

①長所：高所など地上から容易に接近できない箇所の把握にズームアップ映像が有効である。また、動画は立体的な形状のイメージを得やすいため、高度な写真判読技術がなくても地形形状を容易に読み取ることができる。

②短所：地形の抽出精度が、樹木の被覆状態により影響を受ける。また、ズーム機能を使用する場合、画角が倍率により変化するため、映像の解像度（精度）にも違いが生じる。

2.4 空中物理探査

ガンマ線・磁気・電磁波センサーを用い空中から放射線量、磁気強度、比抵抗値を取得する手法である。計測した各物理探査量の分布から地下の地質状況を推察する。

①長所：自然界に存在する磁力や放射線、電磁場を測定することで、間接的に表層地質の種類や地質構造、断層破砕帯、崖錐堆積物や風化層の厚さ等を3次元的に推察することができる。

②短所：他の3手法の原理と比較すると取得できる情報が根本的に異なり、表面の地形起伏や構造物の形状、植生状況などはわからない。

2.5 鉄道防災分野への適用性の検討

表1：土工検査項目に対する各手法の適用性の評価一覧表

土工検査項目	レーザ計測	空中センサ	ヘリビデオ	空中物探
植生繁茂状況、植生異常	×	△	○	×
地形的特徴(尾根、谷)	○	○	○	×
斜面・法面の高さ	○	△	×	×
斜面の傾斜、法面勾配	○	×	×	×
遷急線の分布	○	△	△	×
崩壊地形、崩壊地跡	○	△	△	×
集水地形、沢地形	○	×	△	×
地すべり地形(自然斜面)	○	△	△	×
地すべり土塊(自然・切取)	×	×	×	○
地すべり変位(盛土・切取)	△	△	△	×
リニアメント	○	×	△	○
断層破砕帯	×	×	×	○
岩盤の露頭隙	△	△	△	△
岩盤のオーバーハング	×	△	△	×
地質の分布と地質構造	×	×	×	○
断層性地質の分布	×	×	×	○
斜面・法面の開口亀裂	×	×	△	×
転石・浮石	△	△	△	×
土砂堆積物、崖錐堆積物	○	△	△	○
堆積土砂の厚さ	×	×	×	○
湧水の分布、湧出状態	×	△	△	△
積雪の状況	×	×	○	×
構造物位置、規模、形状	△	△	△	×
構造物の定伏(スレ亀裂)	×	△	△	×

評価凡例 ○:判断できる、△:条件等によっては判断できる、
×:原理的または精度的に判断できない

調査した4手法の特徴をもとに沿線徒歩巡回による実際の検査項目に対する各手法の適用性を評価し表1に整理した。レーザ計測・ラインセンサー・ヘリビデオは、測量的手法や画像・映像を用いて地表面付近の情報を収集するものであり、空中物理探査は物理量から地下の地質状況を推察する手法である。前者3手法と空中物理探査では得られる情報が根本的に異なり、両者を単純に比較することはできないが、表1全体を見渡すと両者はほぼ全項目に対して補完的な関係にあることがわかる。この検討結果を踏まえ、最も評価が高いレーザ計測とそれを補完する空中物理探査の2手法について、モデルエリアにおいて計測を実施し詳細な検討を行った。

3 リモートセンシングによる計測・探査

山間部の鉄道沿線約7kmの周辺域をモデルエリアとして設定した(図1)。このエリア内では、過去に土砂災害等が数例発生している。広域調査のためのリモートセンシング技術として航空機によるレーザ計測とヘリコプターによる空中物理探査について以下に詳細を記す。



図1：モデルエリア

3.1 レーザ計測の実施

航空機によるレーザ計測(図2)は、従来の航空写真測量よりも、非常に多くの座標データを効率よく取得できること、樹木下のデータを取得できること、座標データをデジタルで直接取得できること、基本的に現地での補足作業がいらぬこと等の利点がある。しかしながら、航空レーザ計測は比較的新しい技術であるため、様々な

計測条件によって取得データがどのように変化するかは、必ずしも定量的に明らかにされていないことが多い。そこで飛行高度の違いに着目し、実際に取得した2種類のデータを比較し、調査コストと計測精度の関係について検討を行った。また、得られたデータから地表面の凹凸状態を高精度に図化し、従来の地形図では表現できなかった地表の微地形を表現するDEM (Digital Elevation Model: 数値標高モデル) を作成した。

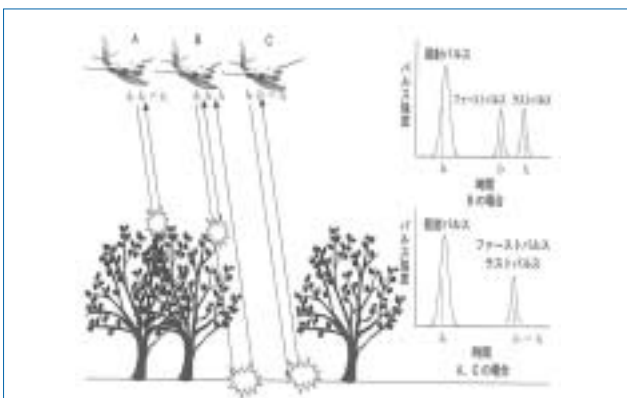


図2：レーザー計測のイメージ図

3.1.1 計測の概要

計測は、線路中心より線路直角方向に約500m離れた範囲を詳細に計測する対地高度1,000m (以下、「低高度」とする) と、約1,500m離れた広範囲を計測する対地高度2,000m (以下、「高高度」とする) で実施した。計測概要を表2に示す。なお、計測コースは、コース1と7、コース3と8、コース5と9がそれぞれ同一になるように設定した (図3、図4)。

表2：計測概要

項目	低高度	高高度
計測実施日	2003年4月28日	
コース数	5コース	
対地高度	約1,000m	約2,000m
飛行高度 (海拔)	1,700m	2,700m
飛行速度	250km/h	
パルス頻度	33,000Hz	
スキャン頻度	28Hz	20Hz
スキャン角度	±20°	
地上計測点間隔	約1.25m	約1.75m
地上計測幅	約730m	約1,460m

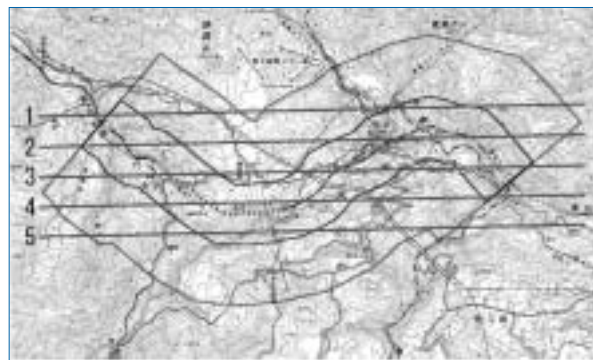


図3：低高度計測コース図

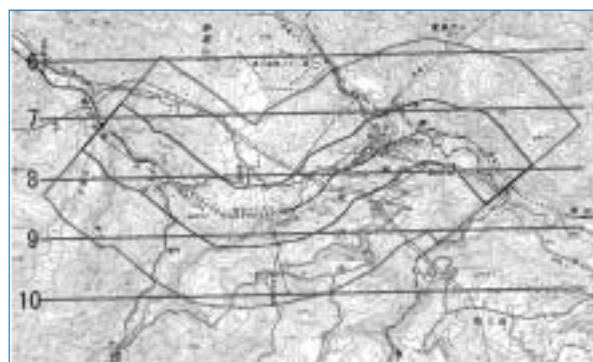


図4：高高度計測コース図

3.1.2 計測の結果

計測を行った時期は、季節的に樹木が繁茂しておらず、地盤データを取得しやすい条件であった。表2に示したように、地上計測点間隔は低高度で約1.25m、高高度で約1.75mとなるが、レーザー計測時において大気中での吸収・散乱や、地表での吸収によるレーザーの減衰などが原因で、照射したレーザー光が全て検出できるわけではない。そこで、取得されたデータから、レーザー照射数に対して検出できなかった割合をデータ欠損率としてそれぞれの高度についてコース毎に欠損率を求めた (表3)。これらの結果から、欠損率は低高度計測で平均0.5%、高高度計測で平均12.1%となり、明らかに対地高度が低いほどデータの欠損率が低いことが判った。

さらに、得られたデータの精度を比較するために、レーザー計測範囲内にある三角点3点の標高値とその周囲3m以内に照射されたレーザー計測点群の標高値を比較した (表4)。平均値で比較した場合、低高度と高高度の計測精度の違いは、わずか0.03mであることがわかる。

表3：各コースのデータ欠損率

コース No.	対地高度 (m)	レーザー照射数(発)	欠損数(発)	欠損率(%)
1	約1,000	5,113,406	5,368	0.1
2		5,051,996	14,905	0.3
3		5,530,994	24,061	0.4
4		4,986,492	36,238	0.7
5		4,753,134	41,776	0.9
低高度平均欠損率				0.5
6	約2,000	5,297,636	658,064	12.4
7		4,880,048	597,418	12.2
8		4,699,912	721,718	15.4
9		5,346,764	744,469	13.9
10		4,507,494	305,328	6.8
高高度平均欠損率				12.1

表4：三角点を使用した精度比較

	低高度 (1000m)		高高度 (2000m)	
	平均誤差	標準偏差	平均誤差	標準偏差
三角点1	-0.15m	0.24m	-0.11m	0.21m
三角点2	-0.11m	0.15m	-0.24m	0.26m
三角点3	-0.19m	0.22m	-0.20m	0.22m
平均値	-0.15m	0.20m	-0.18m	0.23m

このように、データ欠損率からみると当然のことながら低高度が優位であるが、計測高度が低くなればなるほど1コースで取得可能な地上計測幅は狭くなるので同じ範囲を計測するとなると、計測コース数が増え、コストの増加につながる。今回の計測で取得したデータの精度比較において、高度差による大きな差異は無いことから、求める地形情報の精度（図面で言えば縮尺）や鉄道沿線地域の植生の種類（落葉樹か常緑樹かの違いなど）、あるいは計測可能時期等によっては、高高度のレーザー計測でも鉄道防災分野に十分利用可能であると考えられる。

高高度で取得したデータを用いてモデルエリアの高精度のデジタル地形図（図5）とDEMを作成した。これ

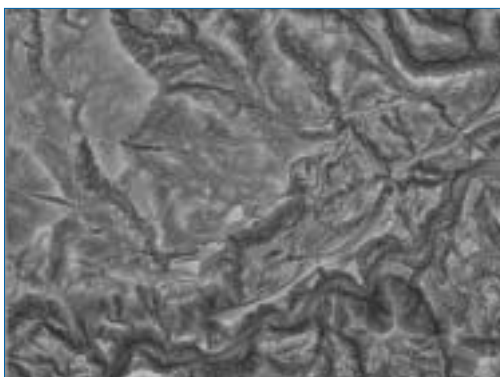


図5：高精度地形図

を地形解析に用いることで、地形量の変化を定量的に求めることが可能となる。

3.2 空中物理探査の実施

空中物理探査は、現地に直接立ち入らずに同一精度で一度に広い範囲の定量的な地質情報を上空から収集する技術である（図6）。モデルエリアを対象に3種類の探査を実施し、その後、現地踏査により取得データの検証を行った。

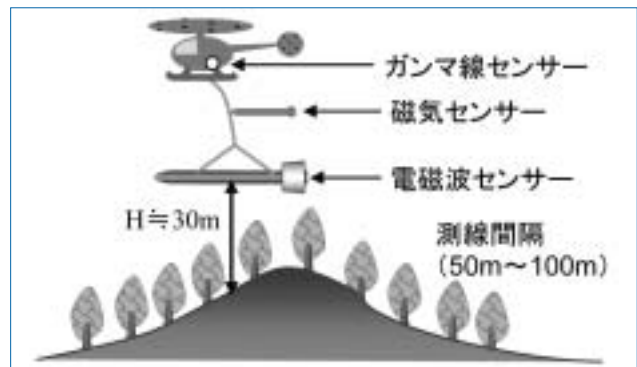


図6：空中物理探査イメージ

3.2.1 探査の概要

ヘリコプターを利用し電磁法探査・磁気探査・放射能探査の3種類の物理探査を実施した。

(1) 電磁法探査：電磁気センサー（5周波数：56KHz、7200Hz、5000Hz、900Hz、385Hz）を収納したバードをヘリコプターによって曳航し、人工的に1次磁場を発生させ、それによって引き起こされる大地の2次磁場を測定・解析し、地下100m～150mまでの鉱体、変質帯等の低比抵抗体の検出および大地の3次元的な比抵抗値の分布を探査する方法である。

(2) 磁気探査：電磁探査と同様に、磁気センサーを収納したバードをヘリコプターによって曳航し、地層、岩石の持つ磁気を測定し、地質構造、岩質、資源の賦存等を探査する方法である。

(3) 放射能探査：ヘリコプターに搭載したγ線スペクトロメータによって、岩石に含まれるウラン、トリウム、カリウム等の天然放射性同位元素が放出するγ線の強度を探査する方法である。

図7に探査エリア、表5に探査概要を示す。

データ取得後に実施した地表地質踏査では、空中物理探査の結果やレーザー計測の結果、既往の地形解析結果と

併せて地質的な特異箇所を抽出し、取得データの検証を行った。



図7：調査エリア

表5：調査概要

項目	内容
調査実施日	空中物理探査：2003年6月2～5日 地表地質踏査：2003年11月5～7日
電磁法探査 磁気探査	・測線間隔：50m, 100m ・調査距離：62km (37測線)
放射線探査	・測線間隔：200m ・調査距離：92km (26測線)

3.2.2 探査の結果及び検証

空中物理探査によって得られた、調査エリア内の放射線量、磁気強度、比抵抗値のうち、調査エリア内の地下

の特徴を特に良く表した電磁法探査による比抵抗分布を図8に示す。このデータから、図中に円で示す調査エリアの山地斜面の下部において高比抵抗と低比抵抗の境界が明確な特異箇所があり、比抵抗断面図(図9)からも地質境界であると推定される。

この箇所の現地踏査を実施した結果、斜面上部の高比抵抗エリアは基盤岩が露出する砂岩頁岩互層の斜面であり(図10上)、斜面下部の低比抵抗エリアは、未固結～半固結状の砂礫層が地表を覆っていることが分かり(図10下)、両地質の分布境界とみなすことができる。

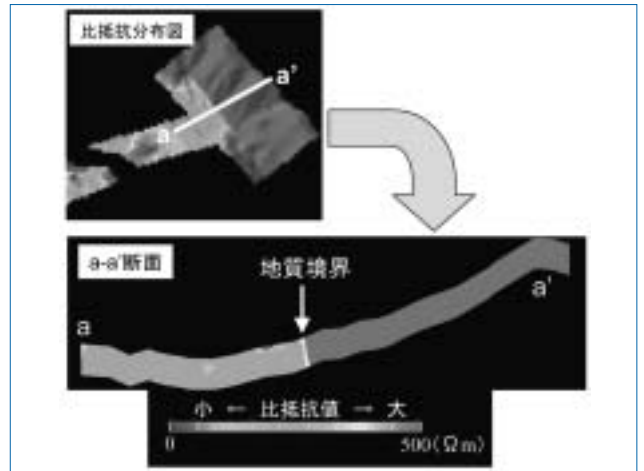


図9：比抵抗断面図

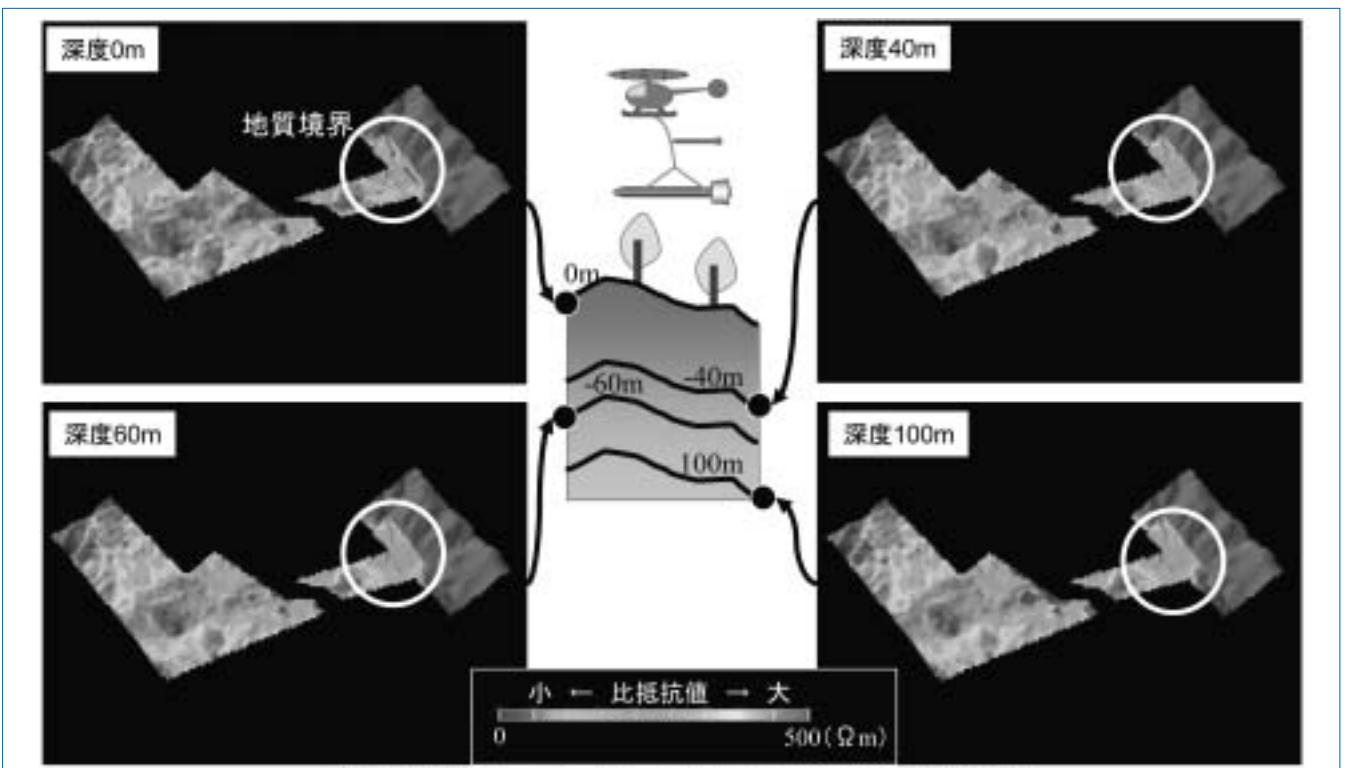


図8：地下深度0m、40m、60m、100mにおける等深度比抵抗分布図

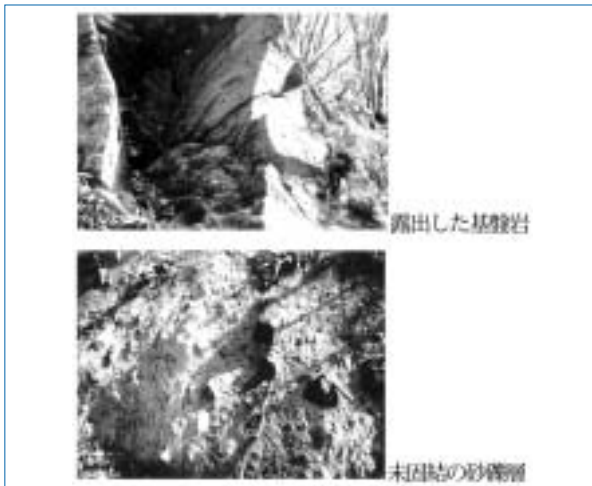


図10：斜面の状況

3.2.3 探査結果のGISへの反映

前述した未固結の砂礫層が分布する斜面では、大小多数の斜面崩壊地が確認されることから、同じ山地斜面であっても表層崩壊の危険性が高いとみなされる。そこで、GISを用いて、比抵抗値の急変境界より斜面下部の低比抵抗域をこれら未固結砂礫層の分布域として抽出し、その分布図にレーザ計測で得られた地盤データから抽出した傾斜角60°以上の範囲をオーバーレイして図11に示す「表層崩壊危険区域」を抽出した。このようにGISの解析機能を活用することで、ビジュアルかつ定量的な危険度評価が可能となる。

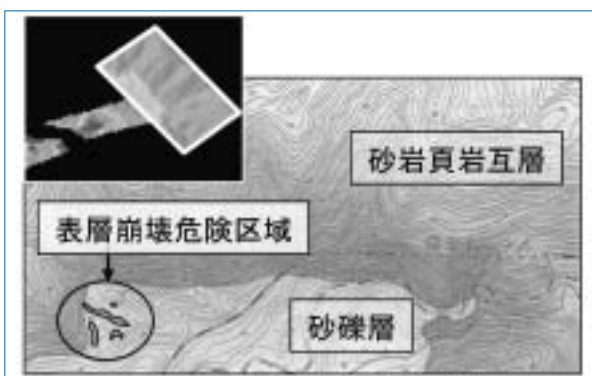


図11：表層崩壊危険区域の抽出

4 斜面のり面の安全性評価システム

リモートセンシングで取得したモデルエリアの地形データ、地質データ等と線路及び構造物のデータベース等を基に、GISを活用して鉄道沿線斜面の安全性を評価するシステムを試作した（図12）。

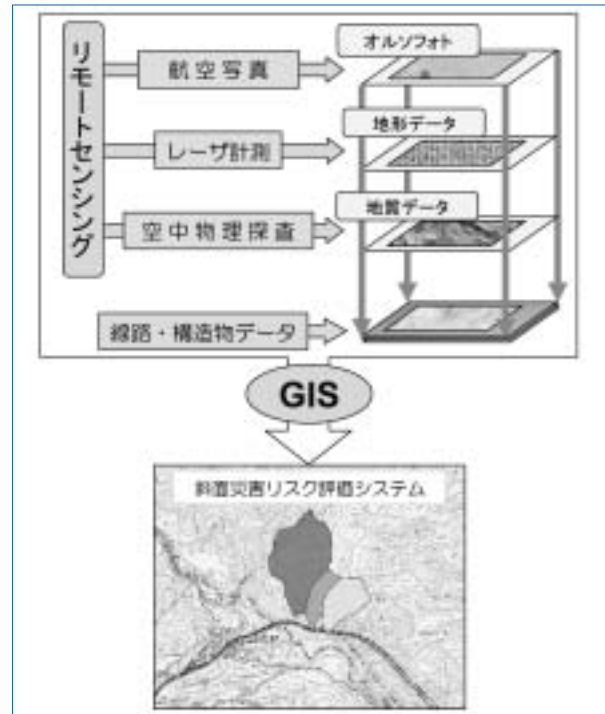


図12：斜面のり面の安全性評価システムのイメージ

4.1 斜面災害危険度評価基準

収集したデータを用いて、GISによる沿線斜面のり面等の定量的危険度評価を行うにあたり、適切な評価基準を災害形態毎に設定する必要がある。今回、検討の対象とした土石流災害についての評価基準は、「土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律（土砂新法）」によるものとした。危険度評価は、溪床勾配や線路横断点の溪床高さ等をもとに、一定の条件を満たす沿線の溪流を対象に表6に示す要因別危険度評価項目をそれぞれ採点法で判定し、その総合点から土石流災害に対する危険度ランクを求めた。

表6：危険度評価基準項目

評価要因	評価項目
地質要因	地質名・地質区分
地形要因	流域面積、流域面積比、遷急線 土石流発生履歴、天然ダム、 崩壊・崩壊跡地、谷頭地形、 0次谷、斜面勾配、溪床勾配
物理探査要因	溪床堆積物、表土、湧水・岩盤

4.2 斜面災害リスク評価システム

試作したシステムでは、まず画面に表示された地形・地質情報をもとに、ユーザーの操作により評価対象箇所

を抽出する。抽出には、対話型のユーザーインターフェースを設け、ユーザーが線路上の任意のポイントを設定すると、そのポイントに対する評価対象斜面や溪流の範囲設定や勾配等の地形量を自動計算し（図13）、それらの値から表6に示した評価項目毎の危険度を採点するとともに予め設定したランクにもとづき画面上の地形図に危険度を色分けして表示する。また、3次元表示も可能であるため、ビジュアル的に災害危険箇所を把握することが可能である。

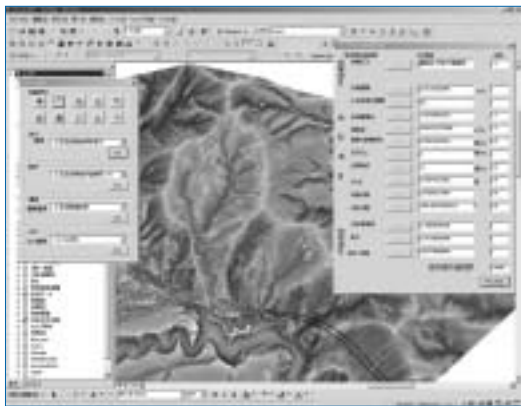


図13：試作システム画面

5 おわりに

鉄道沿線の空間情報を効率良く取得する手法のひとつであるリモートセンシング技術や多様な解析が可能なGISを利用して、沿線斜面のり面等の安全性を定量的に評価するシステムを試作した。

今後は、災害発生の誘因である降雨状況を逐次取り入れたリアルタイムな災害危険度評価システムへ展開して行きたいと考えている。